

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20740217

研究課題名（和文） 相互作用を持つ開放量子系の解析と電気伝導理論への応用

研究課題名（英文） An analysis of open quantum systems with interactions
and its application to the theory of electron conduction

研究代表者

西野 晃徳 (NISHINO AKINORI)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：00466848

研究成果の概要（和文）：多電子散乱状態の厳密解を用いて、相互作用を持つ開放型量子ドットを研究しました。まず、相互作用共鳴準位モデルで記述されるスピン自由度のない開放型量子ドットの輸送特性を調べました。構成された多電子散乱状態は散乱前後で電子の波数の組が保存せず、散乱後、多体束縛状態が出現します。この散乱状態を用い、ランダウアー公式の拡張を通じて、有限バイアス下での平均電流を計算しました。2体束縛状態までを考慮して得られた電流電圧特性はいくつかの既知の結果と定性的に一致しました。次に、アンダーソンモデルで記述されるスピン自由度を持つ開放型量子ドットにおけるエンタングルメント生成を理論的に提案しました。片方の導線でエンタングルしていない入射状態が、もう一方の導線でエンタングルした状態に遷移する確率を厳密に計算しました。結果として、相互作用の効果により、波数の組が保存しないコトンネリング散乱過程ではスピン一重項状態のみが透過できることを発見しました。

研究成果の概要（英文）：We studied interacting open quantum dot systems through an exact solution of many-electron scattering eigenstates. First, we investigated the electron transport property of an open quantum dot system described by the two-lead interacting resonant-level model. The exact many-electron scattering states that we constructed are not in the form of the known Bethe eigenstates in the sense that the wave-number set of the incident plane wave is not conserved during the scattering and many-body bound states appear after the scattering. By applying the scattering states to an extension of the Landauer formula, we calculated the average electric current through the quantum dot under a finite bias voltage. The current-voltage characteristics that we obtained by taking the two-body bound state into account qualitatively agrees with several known results. Next, we theoretically proposed entanglement generation through an open quantum dot system described by the two-lead Anderson model. We exactly obtained the transition rate between the non-entangled incident state in one lead and the outgoing spin-singlet state in the other lead. We found that only the spin-singlet state can transmit in a cotunneling scattering process.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			

年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：物性基礎論

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：メゾスコピック系、開放量子系、量子ドット、電子間相互作用、散乱状態、厳密解、非平衡電流、エンタングルメント

1. 研究開始当初の背景

電気伝導の問題は物性物理学において最も重要で難しい問題の一つであると言われます。特に「電子間の相互作用」と「電源による導線の電位差」の両方の効果を非摂動的に考慮した電気伝導の理論は未だ存在しないばかりか、電気伝導度を近似なしに計算できる相互作用系の例さえもほとんどありません。最近のメゾスコピック系、ナノスケールの系の実験技術の進歩により、電気伝導理論に対する需要は非常に高まっています。実際、量子ドットに代表されるメゾスコピック系の実験結果では、「相互作用」と「電位差」の両方を考慮しないと説明できない現象、例えば非平衡近藤効果などが数多く報告されています。

電気伝導の問題は開放量子系の典型例です。開放量子系で非平衡定常状態を実現する手法として、比較的よく研究されているのがケルディッシュ形式の非平衡グリーン関数を用いる手法です。この手法は二つの平衡系を断熱的に結合させることで、時間発展により非平衡定常状態を得ます。この手法により、ランダウアー公式の相互作用系への拡張がなされています。しかしこれを用いて平均電流を得るためには全系(無限系)の非平衡グリーン関数を求めなければならず、相互作用のある場合には摂動法に頼らざるを得ません。しかし実際の実験系では電子間相互作用はむしろ大きく、摂動法の信頼度はあまり高くありません。

開放量子系における多体散乱状態の構成は一般に非常に困難で、これを用いて非平衡定常状態を実現しようという試みは今までほとんどありませんでした。最近、2本の導線をつないだ開放型量子ドットにおける多電子の散乱状態をベータ仮説法で構成しようという試みがありました。これは、従来、閉じた量子系に対して用いられてきたベ-

ータ仮説法を開放量子系に拡張しようという非常に新しい試みでした。しかし実際に行われた解析は「開放系の擬運動量分布を得るために周期境界条件を課す」という物理的にいささか不自然なものであるばかりか、散乱状態の取り扱いも数学的に正しくないものでした。

2. 研究の目的

(1) 開放量子系において、相互作用の効果を含んだ多電子散乱状態の構成を試みます。考える系は相互作用共鳴準位模型、アンダーソン模型など、従来閉じた量子系として扱われてきた量子ドットを開放量子系として拡張した系です。

(2) 得られた多電子散乱状態を用いて有限バイアス下での平均電流を解析的に計算します。ここではランダウアー公式の仮定、すなわち入射電子が左右の電子溜で十分熱平衡化した後、量子ドットに入射されるとして平均電流を計算します。

3. 研究の方法

多電子散乱状態の具体的な構成により、相互作用を持つ開放型量子ドットの解析を行います。扱う量子ドット系としては、対応する閉じた系に対してベータ仮説法が適用可能な相互作用共鳴準位模型やアンダーソン模型等をまず調べます。これらの系を開放系として扱うためには、量子ドットに2本の無限に長い導線が接続されているとする必要があります。

ランダウアー公式の拡張を目標とするために、左右から接続されている2本の導線に対して、各電子が片方の導線から入射されて、左右の導線に反射、透過される多電子散乱状態を構成します。そのために、まず系を偶モードと奇モードに分解して、偶奇描像での固

有状態を構成します。これらを適当に重ね合わせるにより、左右から入射される多電子散乱状態を構成します。ここで、重ね合わせの係数を系統的に選ぶためには、偶奇描像で「入射状態が自由電子平面波状態となる固有状態」を構成しておくことが重要です。得られた散乱状態を用いて、量子ドットに流れる電流の量子力学的期待値を計算します。この量子力学的期待値は「入射平面波を特徴付けている波数の組」の関数となります。

ランダウアー公式の拡張を通じて、電流の統計力学的期待値（平均電流）を計算します。つまり、「電子が左右の電子溜で十分熱平衡化されて、左右のフェルミ分布に従って量子ドットに入射される」として、電流の量子力学的期待値に対して粒子数無限大の極限、すなわち「電子溜極限」を考えます。電流の量子力学的期待値は平面波の波数の組の関数として与えられているので、この波数が左右の導線に電位差のある場合のフェルミ分布関数に従っているとして積分することで、平均電流が計算できます。また、得られた結果を従来の非平衡グリーン関数の方法と比較します。

4. 研究成果

(1) 相互作用共鳴準位模型で記述される開放型量子ドット(図1)に対して、厳密な多電子散乱状態を構成し、これを用いて有限バイアス下での平均電流を解析的に計算しました。この多電子散乱状態の著しい特徴は、自由電子平面波として入射される状態から、量子ドットでの散乱により、電子間距離に関して指数関数的に減衰する多体束縛状態が出現する点です。この多体束縛状態は電子間相互作用を考慮することにより、初めて現れる束縛状態です。本研究で得た多電子散乱状態の厳密解は散乱前後で各電子の波数の組が保存せず、厳密解の手法としてよく知られるベータ仮説法では構成できない新しいタイプの解です。

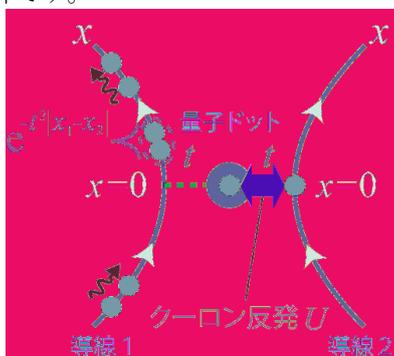


図 1

この多電子散乱状態を用いて、有限バイアス下での平均電流を解析的に得ました。この計算には、「電子が左右の電子溜で十分熱平衡化されて、左右のフェルミ分布に従って量子ドットに入射される」とするランダウアー公式の仮定を、相互作用がある場合に拡張して用いました。得られた電流電圧特性(図2)から、電子間相互作用 U が大きくなるにつれて電流が抑えられて、負の微分伝導度が現れることが分かりました。これは従来の摂動計算、数値計算の結果と定性的に一致します。尚、本研究は、日本物理学会 第 65 回年次大会にて第 4 回日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。

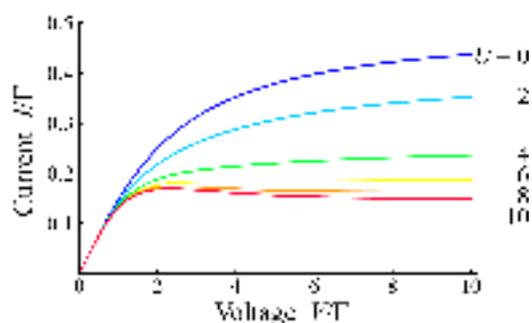


図 2

(2) アンダーソン模型で記述されるスピン自由度を持つ開放型量子ドットを考え、相互作用の効果を含んだ多電子散乱状態の厳密解を構成しました。これを用いて、量子ドットを通じてのエンタングルメント生成確率を厳密に計算しました。スピン上向き、下向きの 2 電子平面波を入射した場合は、スピン自由度がない場合と同様、量子ドット上でのクーロン相互作用（ハバード型相互作用）により、2 電子平面波の一部が 2 電子束縛状態として散乱されます。この 2 電子散乱状態を用いて、一方の導線でエンタングルメントしていない 2 電子状態が、量子ドットでの散乱を通じてエンタングルメントしている状態に遷移する確率を計算しました。結果として、2 電子の各波数が保存しない散乱過程（コトンネリング過程）では、スピン一重項状態のみが量子ドットを透過できることが分かりました。これは量子ドットによるエンタングルメント生成の可能性を示唆しています。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. Takashi Imamura, Akinori Nishino and Naomichi Hatano, Entanglement generation through an open quantum dot: Exact two-electron scattering state in the Anderson model, Physical Review B, 80, 2009, 245323-1-245323-8 (査読有り)
2. Akinori Nishino, Takashi Imamura and Naomichi Hatano, Exact scattering eigenstates, many-body bound states, and nonequilibrium current in an open quantum dot system, Physical Review Letter, 102, 2009, 146803-1-146803-4 (査読有り)

[学会発表] (計 11 件)

1. Akinori Nishino, Takashi Imamura and Naomichi Hatano, Many-electron scattering states and current expectation value in an open quantum dot system, 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, 2010年4月7日, 一ツ橋メモリアルホール
2. 西野晃徳, 今村卓史, 羽田野直道, 開放型量子ドット系における多電子散乱状態の厳密解, 日本物理学会第65回年次大会, 2010年3月22日, 岡山大学
3. 西野晃徳, Entanglement generation and nonequilibrium current in an open quantum dot system with exact many-electron scattering states, CREST量子情報ワークショップ, 2009年12月9日, リゾーピア熱海
4. Akinori Nishino, Analysis of the non-equilibrium current in an open quantum dot system with exact many-body scattering eigenstates, 2009 Annual Statistical Meeting, 2009年12月1日, オーストラリア国立大学数理科学研究所(オーストラリア, キャンベラ)
5. Akinori Nishino, Analysis of the

non-equilibrium current in an open quantum dot system with exact many-electron scattering eigenstates, The second international workshop on dynamics and manipulation of quantum systems, 2009年10月16日, 東京大学小柴ホール

6. 西野晃徳, 今村卓史, 羽田野直道, 開放型量子ドットにおける多電子散乱状態の厳密解, 日本物理学会秋季大会, 2009年9月27日, 熊本大学
7. Akinori Nishino, Analysis of the non-equilibrium current in an open quantum dot system through exact many-body scattering eigenstates, Symposium YKIS2009: Frontiers in Nonequilibrium Physics, 2009年7月31日-8月1日, 京都大学基礎物理学研究所
8. Akinori Nishino, Analysis of the non-equilibrium current in an open quantum dot system through exact many-body scattering eigenstates, Infinite Analysis 09: New Trends in Quantum Integrable Systems, 2009年7月29日, 京都大学理学部数学科
9. 西野晃徳, 今村卓史, 羽田野直道, 開放型量子ドットにおける多電子散乱状態を用いた非平衡電流の解析, 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月30日, 立教大学
10. Akinori Nishino, Many-body scattering states in an open quantum system, The workshop ‘‘Dynamics and Manipulation of Quantum Systems’’, 2008年10月21日, 東京大学小柴ホール
11. 西野晃徳, 今村卓史, 羽田野直道, 開放型量子ドットにおける多体散乱状態: Lippmann-Schwinger方程式の解, 日本物理学会秋季大会, 2008年9月22日, 岩手大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況（計0件）

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西野 晃徳(NISHINO AKINORI)
東京大学・生産技術研究所・助教
研究者番号：00466848